

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-04

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

Interacciones Torsionales y de Control de Generadores Eólicos con Hornos de Arco y Compensadores Estáticos

J. QUISPE*
UTN FRBA
ARGENTINA

A. D. DEL ROSSO
UTN FRBA
ARGENTINA

M. T. ANELLO
UTN FRBA
ARGENTINA

Resumen *– En este trabajo se analizan posibles interacciones entre el control integrado de tensión de una granja eólica y un compensador estático de potencia reactiva (SVC) destinado a reducir las emisiones de flicker de un horno eléctrico de arco. La metodología comprende un análisis basado en el concepto de matriz de ganancia relativa, que es una herramienta analítica para identificar la interdepencia entre variables en un sistema sistemas de múltiples entradas y salidas (MIMO), y simulaciones dinámicas utilizando un modelo detallado de generadores eólicos implementado en Matlab/Simulink. El modelo representa turbinas de velocidad variable con generador a inducción doblemente alimentado (DFIG). La operación del horno de arco se simula utilizando mediciones de potencia activa y reactiva de un horno de arco real, e incluye un modelo detallado de un compensador estático (SVC) destinado a atenuar las oscilaciones de tensión debidas a la operación del horno.*

Palabras clave: Horno de Arco – Generador eólico – SVC – Interacción – Control – Simulación.

1 INTRODUCCIÓN

El problema de interacciones torsionales y de control de generadores sincrónicos convencionales con cargas variables y controles del sistema de transmisión es un tópico maduro en la industria eléctrica, para el cual se han diseñado e implementado diversas soluciones. Sin embargo, el estudio de este tipo de problemas en relación con la generación eólica no ha recibido aún mucha atención por parte de investigadores e ingenieros.

Si bien en general los generadores eólicos son menos propensos a experimentar interacciones torsionales debido a que la frecuencia de los modos mecánicos de estos generadores está muy por debajo de la frecuencia de la red (típicamente de 1 a 5 Hz), se han publicado casos de estudio donde se destaca que en ciertas condiciones los generadores eólicos pueden verse afectados por este tipo de fenómeno [1][2]. Por otro lado, también se ha señalado la posibilidad de interacciones de control de granjas eólicas conectadas en las cercanías de estaciones convertidoras de corriente continua (HVDC) y otros dispositivos de control de redes basados en electrónica de potencia [1]. Tales interacciones pueden provocar oscilaciones cercanas a las frecuencias naturales del sistema mecánico del generador, originando fenómenos de resonancia, con posibles daños mecánicos estructurales. Otras interacciones adversas se pueden presentar entre generadores y sistemas de compensación de potencia reactiva destinados a reducir el impacto de grandes cargas variables en la calidad de potencia. En efecto, las grandes variaciones de potencia activa y reactiva originadas por tales cargas producen variaciones bruscas y repetitivas de la tensión, que deben ser controladas para reducir su impacto en la red eléctrica. Las interacciones adversas de control pueden ocasionar inestabilidad en el funcionamiento de los componentes de la red, afectando la seguridad operativa del sistema, por lo que resulta importante investigar la posible participación de la generación eólica en este tipo de fenómeno, considerando el creciente y significativo aumento de este tipo de generación.

En una publicación anterior [3] los autores de este trabajo presentaron un estudio sobre posibles impactos torsionales en generadores eólicos conectados en las cercanías de hornos eléctricos de arco. Los resultados de ese estudio mostraron que en los casos analizados no se observaron impactos torsionales apreciables sobre el tren de transmisión del conjunto turbina-generador eólico. Se concluyó que la carga variable del horno

* e-mail: joaquispe@frba.utn.edu.ar

podía excitar ciertos modos naturales de los ejes de transmisión, pero no se producía magnificación de las oscilaciones torsionales. Tal fenómeno se atribuyó fundamentalmente a la naturaleza aleatoria y transitoria de la carga del horno, es decir los componentes de frecuencia próximos a las frecuencias de resonancia del sistema mecánico aparecen y se extinguen rápidamente. El estudio también muestra que la magnitud de los torques transitorios puede estar ligada al modo de control de tensión/potencia reactiva de la máquina eólica. Si los generadores eólicos operan en modo de control de tensión se producen fuertes oscilaciones de potencia reactiva generada/absorbida por los mismos, lo que puede manifestarse en el torque electromagnético y torques mecánicos del conjunto de transmisión. Por el contrario, si los generadores eólicos no controlan la tensión, la potencia reactiva de la granja se mantiene estable, como es de esperar.

En este trabajo se amplía el estudio anterior modelando en forma detallada un compensador estático conectado al horno eléctrico – Static var compensator (SVC) – destinado a reducir las emisiones de flicker producidas por el mismo. El principal objetivo es analizar posibles interacciones de control entre el control integrado de tensión de la granja eólica y el regulador de tensión del SVC. La metodología de estudio comprende por un lado el uso del método de la matriz de ganancia relativa, conocido por sus siglas en inglés como matriz RGA (en inglés Relative Gain Array), que es una herramienta analítica para detectar el efecto de cada variable de control sobre las distintas salidas de un sistema de múltiples entradas y salidas (sistema MIMO) [6][7]. El estudio se complementa con simulaciones en el dominio del tiempo utilizando un modelo detallado de generadores eólicos implementado en Matlab/Simulink. La operación del horno de arco se simula utilizando mediciones de potencia activa y reactiva de un horno de arco real. La granja eólica se modela con un modelo agregado de aerogenerador de velocidad variable con generador a inducción doblemente alimentado (DFIG). Si bien el estudio se realiza sobre un modelo genérico de un sistema de potencia, se considera que los resultados cualitativos son relevantes para el sistema argentino, donde pueden encontrarse generación eólica en las cercanías de grandes plantas industriales con hornos de arco.

2 SISTEMA DE ESTUDIO

La Figura 1 muestra un diagrama del sistema de estudio implementado en Matlab/Simulink. El modelo es similar al utilizado en la referencia [3], con la diferencia que se agrega el modelo del SVC.

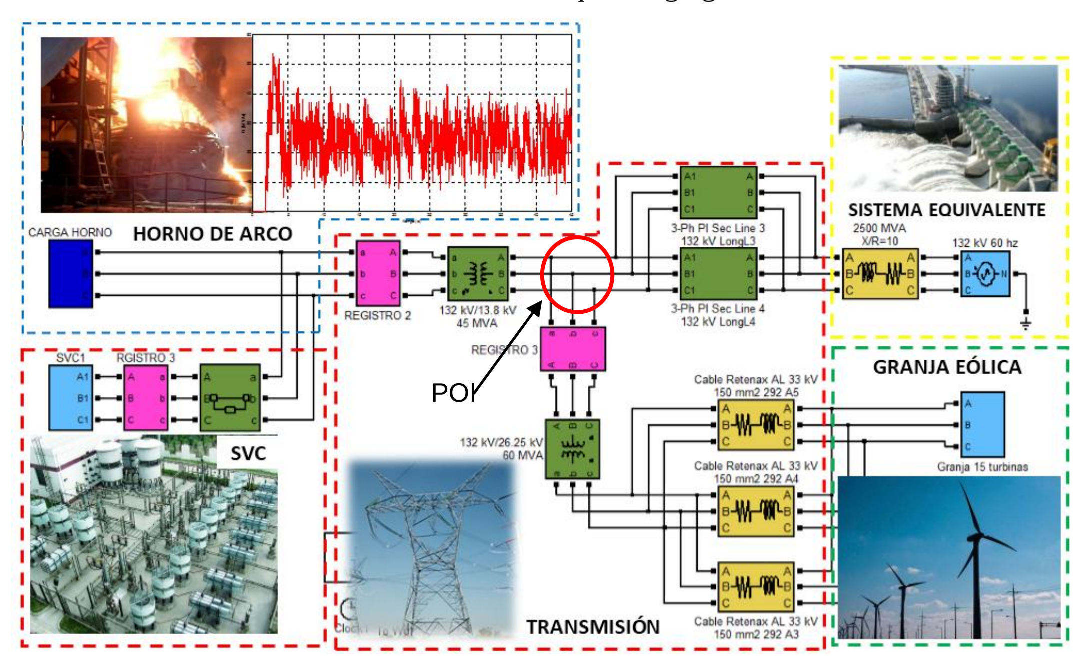


Fig. 1: Diagrama del sistema de análisis implementado

El sistema de estudio consiste en una granja eólica de 30 MW de potencia nominal conectada mediante una línea de transmisión de 132 kV a una red externa representada por un equivalente de red de 2800 MVA. La longitud de esta línea se varía para obtener el valor deseado de potencia de cortocircuito en el Punto de Interconexión (POI), que es el punto común de vinculación de la granja eólica con el horno de arco y la red externa. El horno de arco tiene una potencia nominal de 35 MW y 25 Mvar de potencia reactiva, y se vincula al POI mediante un transformador de rebaje 132/13.8 kV de 45 MVA de capacidad nominal. En paralelo al

punto de conexión del horno de arco se conecta un compensador estático de potencia reactiva (SVC) con una capacidad máxima de 50Mvar.
A continuación se detallan las características de los componentes principales del sistema de estudio:

2.1 Horno Eléctrico de Arco

La Figura 2 muestra en forma esquemática el horno de arco considerado en el análisis [3]. Las Figuras 3 y 4 muestran las señales de potencia activa y reactiva consumidas, medidas en lado de baja de tensión del transformador de conexión. Estas señales se usan para modelar la carga del horno en el modelo de simulación. En estas figuras se puede observar las variaciones bruscas y naturaleza aleatoria de la carga del horno de arco.

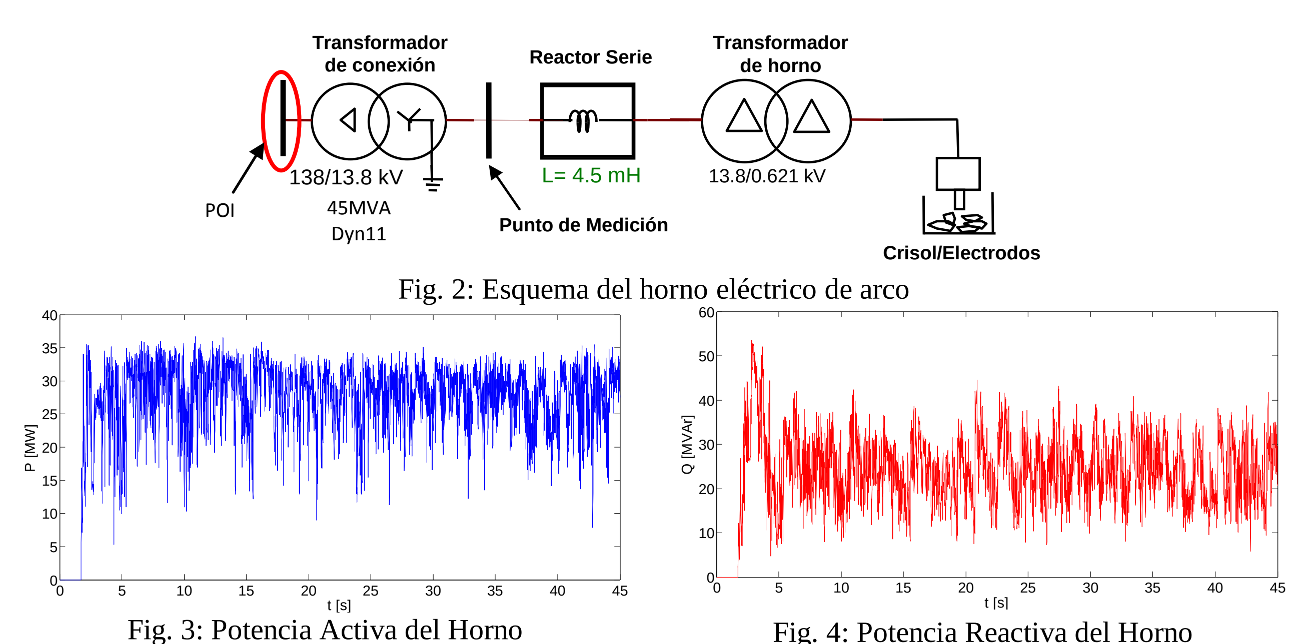


Fig. 2: Esquema del horno eléctrico de arco

Fig. 3: Potencia Activa del Horno

Fig. 4: Potencia Reactiva del Horno

2.2 Generador Eólico

La granja eólica se representó con un modelo agregado de aerogenerador de velocidad variable con generador a inducción doblemente alimentado (DFIG). Para ello se usó un modelo de la librería del toolbox de sistemas de potencia de Matlab/Simuink [4]. Este modela al convertidor electrónico del rotor con un modelo promedio, representándolo con fuentes de tensión equivalentes que generan un valor promedio sobre un ciclo de la frecuencia de “switching”. Para este trabajo se reemplazó el modelo mecánico originalmente provisto en el toolbox con un modelo de tres masas, que permite una representación más adecuada de los fenómenos torsionales del conjunto turbina-generador. Con los valores adoptados para los parámetros mecánicos el aerogenerador presenta modos naturales de oscilación de 1,85 Hz y 21,39 Hz. Por razones de espacio no pueden incluirse mayores detalles del modelo implementado. El lector interesado puede encontrar una descripción más completa en el artículo de la referencia [3].

2.3 SVC

Para representar el SVC se utiliza un modelo de librería del toolbox de sistemas de potencia de Matlab/Simuink [4]. Se trata de un modelo promedio que trabaja con el módulo de la tensión del punto de conexión y calcula la potencia reactiva que debe aportar el SVC a través de una función transferencia (basada en la característica V-I típica). Este modelo puede trabajar en modo realimentado de tensión y modo de potencia reactiva constante. Las características funcionales y operativas del SVC se adoptaron de la instalación de horno descripta anteriormente. Los parámetros de control del SVC fueron sintonizados de modo que el mismo compense de la mejor forma posible las variaciones de tensión producidas por el horno, y permita una operación estable en diferentes condiciones. Se utilizó un procedimiento descripto en [5], y se comprobó el correcto funcionamiento mediante simulaciones.

3 ANALISIS MEDIANTE MATRIZ RGA

En esta sección se presenta un análisis mediante el método de la matriz de ganancias relativas – matriz RGA- para evaluar posibles interacciones de control entre en SVC y el control de tensión de los generadores eólicos

en el sistema de estudio. Se presenta en primer lugar una breve descripción del método. En las publicaciones de referencia [6][7][8] pueden encontrarse más detalles sobre la teoría de este método y ejemplos de aplicaciones en sistemas de potencia.

La matriz RGA es una herramienta analítica utilizada comúnmente en el diseño de control de procesos industriales para determinar en forma óptima que variables de entrada deben utilizarse para controlar las diferentes salidas. En otras palabras, la metodología permite comparar de manera sencilla la ganancia relativa asociada con cada par de variables de entrada-salida, y en última instancia, asociar las variables de entrada y de salida que tienen el mayor efecto sobre la otra, mientras que se minimizan los efectos secundarios no deseados. En este caso se utiliza para evaluar si pueden presentarse interacciones adversas entre los distintos lazos de control del sistema. La matriz RGA tiene una columna para cada variable de entrada y una fila para cada salida del sistema MIMO. La interpretación de los valores de la matriz es la siguiente:

- Cuanto más próximos a la unidad estén los elementos de la matriz más acopladas estarán las variables respectivas.
- El máximo valor en cada fila determina que variables están mayormente acopladas o desacopladas. Por ejemplo, si el elemento G_{23} es el mayor elemento en la fila 2, la entrada numero 2 tiene su mayor impacto sobre la variable de salida 3.
- La suma de cada fila y columna es 1

El cálculo de la matriz puede realizarse mediante ensayos, por medio de un procedimiento analítico si el modelo del sistema está disponible, o mediante una combinación de ambos. A continuación se describe el procedimiento utilizado en este trabajo para calcular la matriz RGA que relaciona el control de tensión de la granja eólica con el control del SVC. La Figura 5 es el diagrama de bloques de estos lazos de control. La matriz **G**, cuyos elementos son G_{11}, G_{12}, G_{21} y G_{22}, contiene las ganancias de estado estacionario de las funciones de transferencia entre las entradas y salidas. Las dos entradas son la referencia de tensión del SVC (V_{ref1}) y la referencia de tensión de la máquina eólica (V_{ref2},). La salida V1 es la tensión que controla el SVC, que en este caso es la barra de 13,8kV a la cual se conecta. Con respecto a la salida del control de tensión del generador eólico (V2) se consideran dos casos: a) el generador controla su tensión terminal, y b) el generador controla la barra de 132 kV del punto de interconexión.

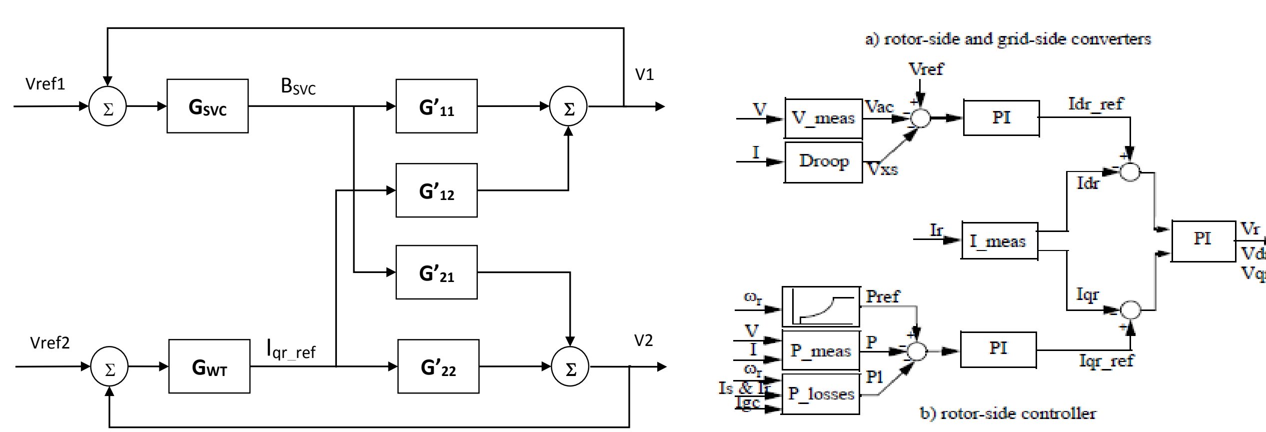


Fig. 5: Representación de los lazos de control

Fig. 6: Control de tensión del generador eólico [4]

Las ganancias de las funciones de transferencia se calculan como:

$$G_{11} = G_{(Vref1\text{-}V1)} = Gsvc * G'_{11}$$
$$G_{21} = G_{(Vref1\text{-}V2)} = Gsvc * G'_{21}$$
$$G_{12} = G_{(Vref2\text{-}V1)} = Gwt * G'_{12}$$
$$G_{22} = G_{(Vref2\text{-}V2)} = Gwt * G'_{22}$$

Donde

- G_{SVC} es la ganancia del control de tensión del SVC. El SVC tiene un control proporcional integral (PI) con un lazo de estatismo. La ganancia de estado estacionario (DC gain) de este lazo es $G_{SVC} = 1/Xs$, donde Xs es el valor del estatismo en por unidad.

- G_{WT} es la ganancia del lazo de control de tensión de la maquina eólica. La salida de ese control es la referencia de la corriente de rotor Idr (Idr_ref) que se muestra en la Figura 6. En el modelo de Simulink está esta ganancia está dada por la constante Ki_volt, que se ingresa como dato.
- Las ganancias G_{11}, G_{12}, G_{21} y G_{22} se obtienen mediante ensayos simulados como el modelo Simulink: En el primer ensayo se introduce una perturbación en V_{ref1} (referencia del SVC) y se miden los cambios en las dos salidas V1 y V2 con respecto a los valores iníciales, una vez que las variables se han estabilizado. En el segundo ensayo se perturba la variable de entrada V_{ref2} y se miden los valores finales de las salidas V1 y V2.
- Las ganancias G_{ij} se calculan dividiendo los cambios en las salidas por los correspondientes cambios en las señales de entrada.
- Con esa matriz se puede obtener la matriz RGA mediante un simple cálculo matricial $RGA = G(0) \otimes (G(0)^{-1})^T$, donde el símbolo ⊗ indica el producto elemento por elemento.

El cálculo de matriz RGA para el sistema de estudio da el siguiente resultado:

TABLA I. RESULTADOS DEL ANÁLISIS MATRIZ RGA

a) Generador eólico controlando su tensión terminal	b) Generador eólico controlando la barra de 132kV
RGA = $\begin{bmatrix} 1{,}0154 & -0{,}0154 \\ -0{,}0154 & 1{,}0154 \end{bmatrix}$	RGA = $\begin{bmatrix} 1{,}1464 & -0{,}1464 \\ -0{,}1464 & 1{,}1464 \end{bmatrix}$

Se observa que los valores en la diagonal principal son fuertemente predominantes, con valores fuera de la diagonal muy chicos, lo que indica que la interacción entre los lazos de control del SVC y del regulador de tensión de la granja eólica es mínima. Se ve claramente que cuando el control de tensión del generador está ligado a la barra de 132kV la interacción con el SVC es más notable, sin ser significativa. El hecho de que los valores no diagonales sean negativos indica que el control tendría un efecto opuesto al buscado. Por ejemplo, si se deshabilitara el control de tensión del generador eólico, el control del SVC afectaría en forma inversa a la tensión del generador, reduciendo esta tensión cuando el sistema necesita que la misma sea elevada y viceversa, haciendo inestable al sistema. En este caso la interacción es mínima por lo que puede esperarse que tal efecto no se manifieste en forma apreciable. Sin embargo, si tal interacción fuera mayor, sería necesario tomar medidas para evitar que se degrade el control de tensión. Debe destacarse que los valores de la matriz son independientes de las ganancias G_{SVC} y G_{WT} ya que las mismas afectan por igual los dos lazos de control.

Es importante destacar que este tipo de análisis solo permite identificar interacciones de estado estacionario. Sin embargo, en el sistema que se analiza en este estudio se presentan frecuentes y severos estados transitorios, fundamentalmente durante la operación del horno de arco, donde las características dinámicas del sistema de los lazos de control juegan un papel muy importante en la estabilidad y desempeño del control. Por ese motivo es necesario complementar el estudio de interacciones considerando la dinámica del sistema. En este trabajo tal análisis se lleva a cabo mediante simulaciones en el dominio del tiempo que se presenta en la sección siguiente.

4 ANALISIS DINAMICO

El modelo implementado se utilizó en simulaciones en el dominio del tiempo para analizar el desempeño de los sistemas de control del generador eólico y del SVC, tanto cuando trabajan en forma conjunta como en forma independiente. Se simuló el proceso de arranque del horno utilizando los registros de potencia activa y reactiva presentada en la Figuras 3 y 4. Los escenarios básicos considerados son los siguientes:

- *Caso 1*: Con el SVC operativo y la granja eólica controlando su potencia reactiva
- *Caso 2*: Con el SVC operativo a la granja eólica controlando tensión. Este control intenta mantener el nivel de tensión en las barras de 132kV del punto de conexión.
- *Caso 3:* Con el SVC fuera de servicio y la granja eólica controlando tensión.

A su vez, para cada uno de estos escenarios se plantearon distintos casos de estudio variando ciertos parámetros operativos y de control a los efectos de identificar cuales afectan en mayor medida el desempeño del sistema. Se estudiaron una gran variedad de combinaciones, pero solo se presentan en este trabajo las más significativas. Los parámetros que se varían son: la potencia de cortocircuito S_{CC}, la ganancia del control

de reactivo del aerogenerador (K_{VAR}), la ganancia del control de tensión del aerogenerador (K_{I_VOLT}), el estatismo del SVC (X_S) y la ganancia integral del SVC(K_{I_SVC}). Los distintos casos estudiados se presentan en la tabla siguiente:

TABLA II. DESCRIPCION DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Caso	S_{CC} [MVA]	K_{VAR}	K_{I_VOLT}	X_S (%)	K_{I_SVC}
1a	2340	20	-	3	2600
1b	2340	50	-	3	2600
1c	2340	20	-	1	2600
1d	1820	20	-	3	2600
1e	2340	20	-	3	3000
2a	2340	-	20	3	2600
2b	2340	-	50	3	2600
2c	2340	-	20	1	2600
2d	1820	-	20	3	2600
2e	2340	-	20	3	3000
3a	2340	-	20	-	-
3b	2340	-	50	-	-
3c	1820	-	20	-	-

Con los resultados de las simulaciones se calcularon parámetros estadísticos para analizar y comparar los distintos casos. Se presentan en la Tabla III el análisis estadístico para la tensión en el punto de conexión y el torque en el eje de la turbina. Las figuras 7 a 14 presentan resultados seleccionados de algunas de las simulaciones realizadas.

TABLA III. RESULTADOS ESTADISTICOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

	Tensión en el POI					Torque en el eje de la turbina				
Caso	**MED**	**MAX**	**MIN**	**STD**	**KUR**	**MED**	**MAX**	**MIN**	**STD**	**KUR**
1a	135,26	136,71	133,06	3,076	1865,3	0,6197	0,6267	0,5520	0,0971	--
1b	135,40	136,85	133,20	2,906	2090,3	0,6197	0,6202	0,6191	0,0001	6,407
1c	135,13	136,71	133,02	2,892	2116,1	0,6197	0,6203	0,6189	0,0002	5,214
1d	134,93	136,72	132,38	2,917	2032,3	0,6197	0,6203	0,6189	0,0001	5,223
1e	135,40	136,85	133,19	2,901	2091,7	0,6197	0,6202	0,6191	0,0001	6,273
2a	135,14	137,60	132,91	3,066	1882,0	0,5892	0,8556	0,3956	0,1189	--
2b	135,15	136,70	133,25	2,897	2101,8	0,5909	0,7205	0,3969	0,0440	8,576
2c	134,89	136,50	133,14	2,886	2118,8	0,5917	0,6592	0,5129	0,0232	5,933
2d	134,59	136,83	132,66	2,911	2028,8	0,5891	0,6927	0,4749	0,0312	6,751
2e	135,15	136,96	133,47	2,899	2095,7	0,5897	0,6880	0,4923	0,0291	6,191
3a	135,60	138,68	133,09	3,132	1753,5	0,7243	1,0067	-0,0329	0,1093	--
3b	135,62	138,17	133,34	2,977	1912,8	0,5872	0,8219	0,2594	0,0739	8,850
3c	135,07	138,11	132,07	3,029	1756,0	0,5855	0,7850	0,3930	0,0530	7,609

Los resultados permiten inferir que no se producen interacciones adversas severas entre el control del SVC y el control de tensión de la granja eólica que pongan en riesgo la operación estable del sistema, aún cuando el generador eólico controle la barra de 132kV del POI. Sin embargo, se ve que en esas condiciones el aerogenerador experimenta oscilaciones de potencia, que se amortiguan rápidamente. Como se ve en la Figura 8, cuando el generador controla su potencia reactiva no se producen tales oscilaciones. Lo mismo ocurre cuando controla su tensión terminal. Comparando los casos 2 y 3 se puede observar que cuando el SVC está fuera de servicio la calidad del control de la tensión en el POI se degrada levemente. Las variaciones de potencia reactiva de la granja eólica son más intensas, debido a que tienen que cubrir el déficit de aporte del SVC. Como consecuencia se intensifican los torques transitorios en el eje de la turbina.

La comparación de los casos 2a con 2b muestra que el control de tensión mejora cuando la ganancia del control de tensión del aerogenerador (K_{I_VOLT}) es mayor. Se observa sin embargo que en esas condiciones la amplitud del torque en el eje aumenta ligeramente. También se puede observar que al reducir el estatismo del SVC del 3% y 1% se produce una leve mejora en la tensión, y la amplitud de las variaciones del torque en el eje se reduce levemente (comparación de casos 2a con 2c).

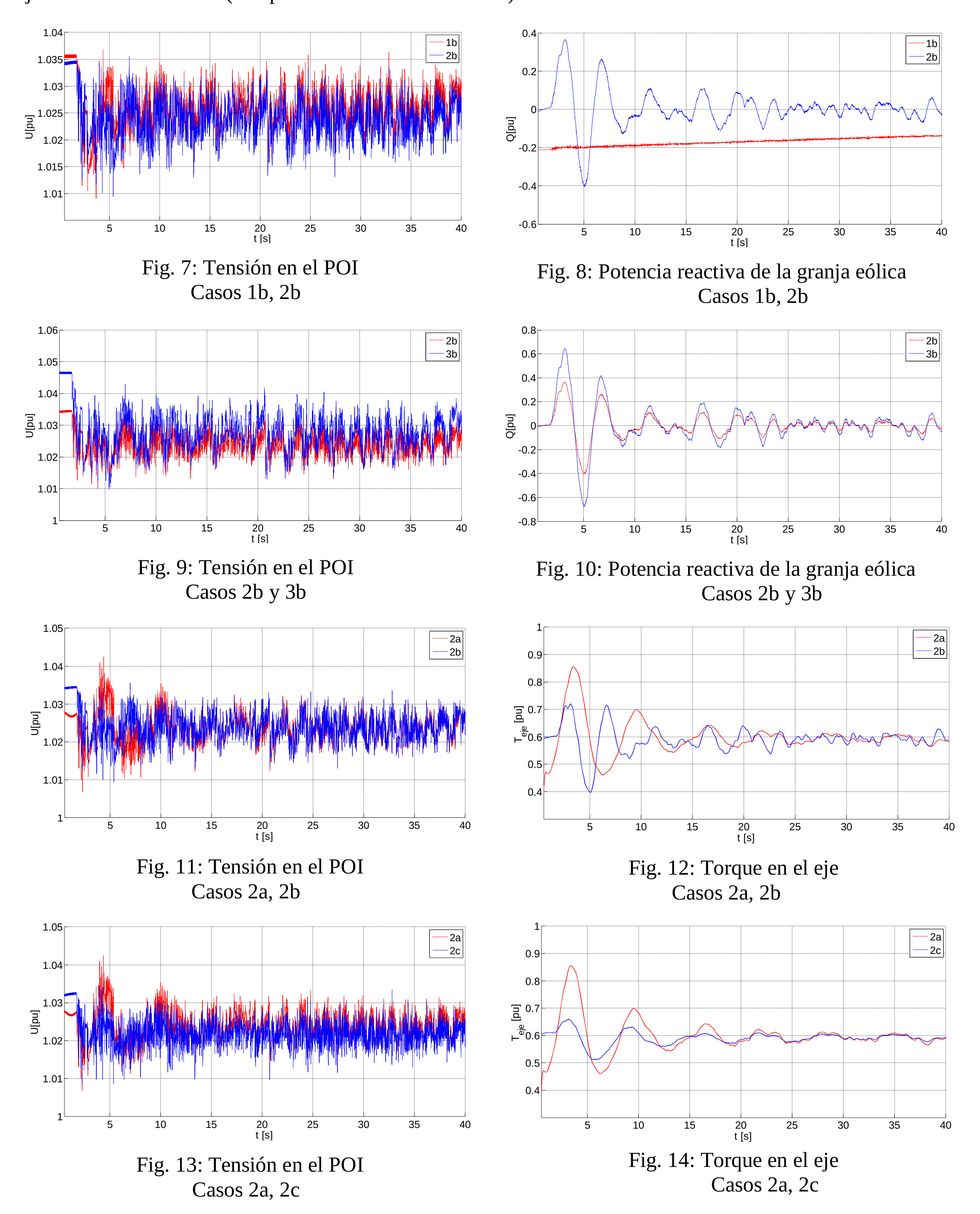


Fig. 7: Tensión en el POI
Casos 1b, 2b

Fig. 8: Potencia reactiva de la granja eólica
Casos 1b, 2b

Fig. 9: Tensión en el POI
Casos 2b y 3b

Fig. 10: Potencia reactiva de la granja eólica
Casos 2b y 3b

Fig. 11: Tensión en el POI
Casos 2a, 2b

Fig. 12: Torque en el eje
Casos 2a, 2b

Fig. 13: Tensión en el POI
Casos 2a, 2c

Fig. 14: Torque en el eje
Casos 2a, 2c

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis de posibles interacciones torsionales y de control de una granja eólica con un compensador estático de potencia reactiva (SVC) y un horno de arco. El análisis se realiza mediante un procedimiento analítico basado en el concepto de matriz de ganancias relativas, complementado con simulaciones dinámicas utilizando un modelo detallado de generadores eólicos implementado en Matlab/Simulink. El modelo representa turbinas de velocidad variable con generador a inducción doblemente alimentado (DFIG). La operación del horno de arco se simula utilizando mediciones de potencia activa y reactiva de un horno de arco real, e incluye un modelo detallado de un compensador estático (SVC) destinado a atenuar las oscilaciones de tensión debidas a la operación del horno. El sistema de estudio consiste en un horno de arco y una granja eólica conectadas en un punto común de vinculación con la red de potencia. Esta última se modela con un equivalente de red con una potencia de cortocircuito de 2800 MVA.

Los resultados del estudio muestran que para las condiciones analizadas no se presentan interacciones de control adversas severas entre el generador eólico y el SVC. Tal interacción puede manifestare en mayor medida cuando el control de tensión del generador utiliza como referencia la barra de alta tensión del punto de interconexión. En ese caso la maquina eólica se ve sometida a mayores exigencias en cuanto a la provisión de potencia reactiva, con lo que pueden originarse oscilaciones de potencia que repercuten en los torques mecánicos del tren de transmisión. La metodología de la matriz RGA es una herramienta útil para detectar interacciones entre controladores, sin embargo solo provee información respecto a las condiciones de estado estacionario. En casos como el presentado en este trabajo, donde se manifiestan fenómenos dinámicos severos, es necesario complementar el análisis de interacción con estudios con modelos dinámicos. Pueden utilizarse técnicas de análisis tales como cálculo de autovalores y autovectores y análisis de respuesta en frecuencia que son útiles para identificar las causas y el impacto relativo de ciertos parámetros y variables del sistema en la respuesta del mismo. Sin embargo, es siempre conveniente recurrir a la simulación en el dominio del tiempo con modelos completos, los cuales permiten una representación más fidedigna del desempeño de los sistemas.

6 REFERENCIAS

[1]. Working Group C4.601, Modeling and Dynamic Behavior of Wind Generation as it Relates to Power System Control and Dynamic Performance, August 2007.

[2]. Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins and Ervin Bossanyi, 'Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons Inc, 2004.

[3]. A. Del Rosso, M. Anello, A. Nito y J. Quispe, "Análisis de Posibles Impactos Torsionales de Generadores Eólicos con Cargas Variables", ERIAC XIV, Paraguay 22-26 de mayo de 2011.

[4]. Matlab/Simulink, "Power System Toolbox", The Mathwork, Inc., 2009.

[5]. M. Mathur and R. Varma, "Thyristor-Based FATCS Controllers for Electrical Transmission Systems", Wiley-IEEE Press; 1 edition 2002

[6]. L. Zhang, P.X. Zhang, H.F. Wang, Z. Chen, W. Du, Y.J. Cao and S.J. Chen, "Interaction assessment of FACTS control by RGA for the effective design of FACTS damping controllers", IEE Proc.-Generation Transmission and Distribution, Vol. 153, No. 5, September 2006.

[7]. *Dynamic Interactions among Multiple FACTS Controllers*, EPRI Palo Alto 2011 [EP-P37059/C16745]

[8]. Li, H.C.; Dong, P. ; Liu, M.B. and Wang, Q., "Interaction analysis of FACTS controllers based on relative gain array principle", 2011 4th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)

[9]. Ta-Peng Tsao and Jong-Ian Tsai, "Torsional Interactions between an Electrical Arc Furnace Load and a Turbine-Generator Set", 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004) April 2004 Hong Kong.